

## 用力-距离曲线标定原子力显微镜力测量系数的研究\*

许中明<sup>1,2</sup> 黄平<sup>2</sup>

(1. 顺德职业技术学院 广东顺德 528300; 2. 华南理工大学机械工程学院 广东广州 510640)

**摘要:** 推导出根据原子力显微镜测量得到的电压信号计算法向力和横向力的公式, 然后研究用力-距离曲线标定公式中测量系数的方法, 并用几种不同的探针和试样测试和确定所用原子力显微镜的测量系数。从测量的结果可以看到, 不同探针和试样的测量值较为接近, 表明该方法可行。当原子力显微镜测量系统的光路对称时, 用本方法标定测量系数较为简单和准确。

**关键词:** 力曲线; 测量系数; 法向力; 横向力; 原子力显微镜

**中图分类号:** TH742 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2007)2-111-3

## Calibrating Force Measurement Coefficient of Atomic Force Microscopy with Force-distance Curve

Xu Zhongming<sup>1,2</sup> Huang Ping<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shunde Polytechnic, Shunde Guangdong 528300, China;

2. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The equations to calculate normal and lateral force between sample and tip of an atomic force microscopy from the voltage measured were deduced. The method to gain measurement coefficient of an atomic force microscopy on the equation with a force-distance curve was discussed. Different tips and samples were used to measure the coefficient. From the results of the experiment, the values gained are close to each other, which show the method is feasible. The method is simple and accurate when the path of ray of the atomic force microscopy is symmetry.

**Keywords:** force-distance curve; measurement coefficient; normal force; lateral force; AFM

原子力显微镜由于其优异的性能, 近年来在摩擦学、材料科学和生命科学等众多领域应用广泛。原子力显微镜主要用于表面微观形貌甚至原子级形貌的检测, 以及材料表面纳米尺度的力学特性的测量<sup>[1]</sup>。原子力显微镜在表面微观形貌测量方面已经比较成熟, 可以使用专用的校准块标定或直接利用 HOPG、云母等层状晶体的晶格距离来标定, 通常制造厂家出厂时就进行标定。但在力测量方面, 特别是横向力(摩擦力)的测量, 定量标定较为困难<sup>[2-3]</sup>, 迄今仍有待进一步研究, 厂家一般不提供标定参数。

目前原子力显微镜力测量的标定有仪器光路法<sup>[4]</sup>、斜面法<sup>[5]</sup>、摩擦环斜率法<sup>[6]</sup>等方法, 但这些方法较为复杂, 且由于需要测量多个参数, 因而容易积累误差。

本文作者推导出根据原子力显微镜测量得到的电压信号计算法向力和横向力的公式, 然后研究用力-

距离曲线标定公式中测量系数的方法, 并用不同的探针和试样标定所用原子力显微镜的测量系数。

### 1 根据原子力显微镜的测量信号计算法向力和横向力

原子力显微镜的工作原理<sup>[7]</sup>见图 1 所示, 它是用一个一端固定, 另一端装有针尖的对微弱作用力非常敏感的弹性悬臂梁来检测样品表面形貌或其它表面性质。当针尖在样品上扫描时(通常是扫描器带动样品移动), 针尖和样品之间的相互作用力就会引起微悬臂发生形变, 微悬臂的形变可以作为样品与针尖相互作用力的直接度量。为了测量微悬臂的形变, 用一束激光照射到微悬臂背面, 微悬臂将激光束反射到一个光电位置检测器, 位置检测器不同象限接收到的激光强度差值的变化与微悬臂的形变量存在比例关系。反馈系统根据位置检测器电压的变化, 不断调整针尖或样品 Z 轴方向的位置, 可以保持针尖与样品间的作用力基本不变, 从而可以得到样品的表面形貌图像。

如图 1 所示, 位置检测器通常有 4 个象限, 不同象限接收到的光强差产生电压差, 通过测量这个压差的变化, 就可以得到光斑位置的变化量, 从而计算出微悬臂形变量的大小。对于法向力的测量, 可以通过

\* 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (04020089)。

收稿日期: 2006-09-12

作者简介: 许中明 (1971—), 男, 博士研究生, 主要从事摩擦机理与控制研究。E-mail: exzm@sina.com.

测量上下象限 (T-B) 电压差的变化得到光斑位置的变化量及微悬臂形变量, 再利用微悬臂的法向力常数及相关尺寸, 就可以算出针尖与样品表面间的法向作用力。同样, 对于横向力测量, 如果探针与样品表面存在横向作用力, 探针悬臂会发生左右扭曲, 这个横向扭曲的大小可以通过测量位置检测器左右象限 (L-R) 电压差的变化得到, 再利用微悬臂的横向力常数及相关尺寸, 就可以算出针尖与样品表面间的横向作用力。

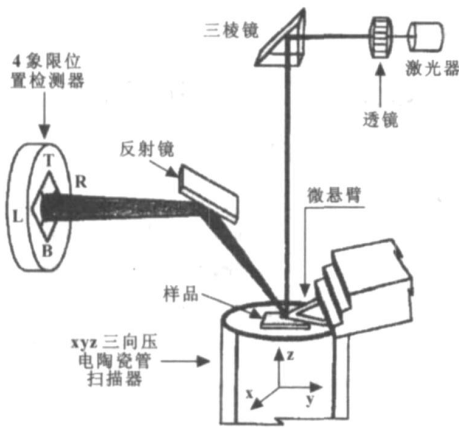


图 1 原子力显微镜工作原理示意图

因此, 当悬臂的刚度和有关尺寸参数已知时, 可以根据弹性力学理论计算出探针受到的法向力和横向力的大小, 计算中用到的参数和符号见图 2。

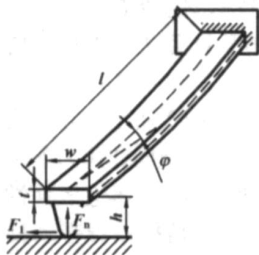


图 2 原子力显微镜探针受力计算图

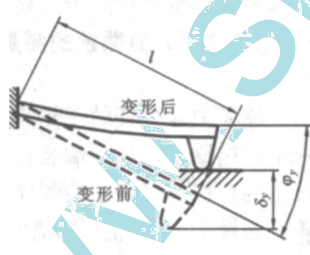


图 3 微悬臂法向变形量计算图

1.1 法向力的计算

当微悬臂变形量较小时, 可以认为其受力与变形量的关系符合虎克定律, 因此其所受到的法向力为

$$F_n = K_{c,y} \cdot y \tag{1}$$

式中:  $K_{c,y}$  为微悬臂的法向力常数 (N/m);  $y$  为法向变形量。

法向变形量  $y$  可以根据微悬臂的扭转角算出。如图 3 所示, 根据材料力学公式<sup>[8]</sup>, 可知

$$y = \frac{F_n l^3}{3EI} \tag{2}$$

$$y = \frac{F_n l^3}{3EI} \tag{3}$$

式中:  $l$  为微悬臂的长度;  $y$  为微悬臂的法向扭转角 (rad);  $E$  为材料的弹性模量;  $I$  为微悬臂的惯性矩。

将式 (3) 代入式 (2), 得

$$y = \frac{2}{3} l \cdot \theta_y \tag{4}$$

微悬臂的法向扭转角  $\theta_y$  可以通过测量位置检测器的电压变化算出:

$$\theta_y = k_y \cdot V_y \tag{5}$$

式中:  $V_y$  为反射光斑偏移引起的位置检测器  $Y$  向电压变化;  $k_y$  为原子力显微镜  $Y$  向测量系数 (rad/V), 即位置检测器  $Y$  向电压变化 1 个单位时对应悬臂转动的角度。

将式 (4)、(5) 代入式 (1), 得

$$F_n = \frac{2}{3} K_{c,y} \cdot l \cdot k_y \cdot V_y \tag{6}$$

1.2 横向力 (摩擦力) 的计算

参照根据位置检测器电压信号计算法向力的过程, 可以得到微悬臂探针受到的横向力的计算公式为

$$F_t = \frac{2}{3} \cdot K_{c,x} \cdot h \cdot k_x \cdot V_x \tag{7}$$

式中:  $K_{c,x}$  为悬臂探针的横向刚度 (N/m);  $h$  为探针高度 (m);  $V_x$  为光斑位置检测器  $X$  向的电压变化;  $k_x$  为原子力显微镜  $X$  向测量系数 (rad/V); 即 4 象限光斑位置检测器  $X$  向电压变化 1 个单位时, 对应悬臂  $X$  向转动的角度。

2 用力-距离曲线标定测量系数  $k_y$  的方法

要测量并定量计算法向力和横向力, 必须得到原子力显微镜 4 象限光斑位置检测器的电压变化与微悬臂转动角度的关系, 即必须知道  $k_x$  与  $k_y$  的值。

原子力显微镜最重要的功能之一是能够测量微悬臂探针与样品之间的作用力与其距离的关系曲线, 即力-距离曲线。由于力-距离曲线包含了样品与针尖之间的大量重要信息, 因此在表面科学、材料工程、生物学等各个领域得到广泛应用<sup>[9]</sup>。下面首先研究通过力-距离曲线实验来标定原子力显微镜的  $Y$  向测量系数  $k_y$ 。

在力-距离曲线实验过程中, 原子力显微镜的压电陶瓷管扫描器带动试样沿扫描器  $Z$  向由位置 1 移动到位置 2, 如图 4 所示,

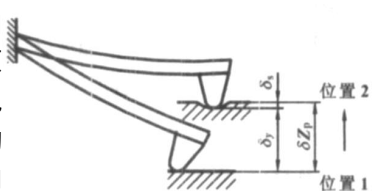


图 4 微悬臂的法向变形量与压电陶瓷扫描器法向位移的关系

其位移变化量与微悬臂的法向变形量存在以下关系：

$$y = Z_p - s \tag{8}$$

式中： $y$  为微悬臂的法向变形量； $Z_p$  为扫描器  $Z$  向（对应微悬臂的  $Y$  向）位移变化量； $s$  为试样的变形量。

当试样的弹性模量远高于微悬臂的弹性力常数时，例如云母、单晶硅和 HOPG等试样， $s$  实际上很小，可以忽略，即

$$y = Z_p \tag{9}$$

将式 (4)、(5) 代入式 (9)，得

$$k_y = \frac{3}{2} \cdot \frac{Z_p}{l \cdot V_y} \tag{10}$$

因此，只要测量出位置检测器随扫描器  $Z$  向移动时相应的电压变化，就可以通过式 (10) 算出  $k_y$ 。

由于通常情况下原子力显微镜  $X$  向和  $Y$  向的光程相同，即测量系统的光路是对称的，故

$$k_x = k_y \tag{11}$$

因此可以通过测量  $Y$  向测量系数得到  $X$  向测量系数。

### 3 测量系数的标定实验

实验时，在原子力显微镜扫描器  $Z$  向逐渐施加 -10 ~ 10 V 的电压，所使用扫描器的伸缩系数为 3.5 nm/V，即扫描器  $Z$  向对应的位移为 -35 ~ 35 nm。取 200 个测量点，测量出各点对应位置检测器的法向电压差，根据所得到的数据绘制出力距离曲线。本实验一共做了 9 组，分别对应不同的探针和实验，典型测量结果如图 5 所示。

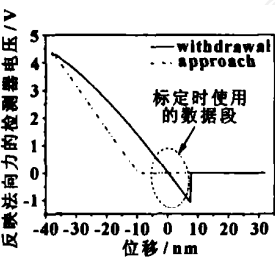


图 5 标定实验中典型的力距离曲线（试样为云母，悬臂探针代号为 NSC36/A1 BS-A，扫描器的伸缩系数为 3.5 nm/V）

表 1 力距离曲线实验结果

序号	样品	悬臂长度 / $\mu\text{m}$	$k_y$
1	HOPG	110	0.000 140
2	HOPG	90	0.000 095
3	HOPG	130	0.000 089
4	云母	110	0.000 097
5	云母	90	0.000 088
6	云母	130	0.000 110
7	单晶硅	110	0.000 100
8	单晶硅	90	0.000 111
9	单晶硅	130	0.000 093

由于脱离粘附点（即发生跳跃点）前一段的线性度最好，且此时以弹性变形为主，因而受样品材料的力学性能影响也最小，故数据分析时取跳跃点前 50 个测量数据，如图 5 所示。实验结果见表 1。

计算上面 9 组实验结果的平均值，得

$$k_y = 0.000 103$$

根据作者所用原子力显微镜的制造厂家本原纳米仪器公司所提供的参数， $X$  向和  $Y$  向的光程基本相同，测量系统的光路是对称的，因此

$$k_x = k_y = 0.000 103$$

### 4 结论

(1) 各组测量结果较为接近，表明该方法可行。

(2) 由于通常情况下原子力显微镜测量系统的光路是对称的，因此用本方法标定测量系数较为简单和准确。

### 参考文献

- [1] 白春礼，田芳，罗克. 扫描力显微术 [M]. 北京：科学出版社，2000.
- [2] Robert G C, Mark G, Reitsma S B, et al Quantitative comparison of three calibration techniques for the lateral force microscope [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72 (8): 3304 - 3312.
- [3] Gibson C T, Johnson D J, Anderson C, et al Method to determine the spring constant of atomic force microscope cantilevers [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75 (2): 565 - 567.
- [4] Liu E, Blanpain B, Celis J P. Calibration procedures for frictional measurements with a lateral force microscope [J]. Wear, 1996, 192: 141 - 150.
- [5] Varenberg M, Etsion I, Halperin G. An improved wedge calibration method for lateral force in atomic force microscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74 (7): 3362 - 3367.
- [6] Robert G, Cain S B, Neil W P. Force calibration in lateral force microscopy [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 227: 55 - 65.
- [7] Ruan J A, Bhushan B. Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76 (9): 5022 - 5035.
- [8] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京：高等教育出版社，1992.
- [9] Ceppella B, Dietler G. Force-distance curves by atomic force microscopy [J]. Surface Science Report, 1999, 34: 1 - 104.